科学読本

音とオーディオ (7)

平田能睦

6章：音の間仕切

屋根と壁があればとりあえず雨風をしのぐことはできますが，音を防ぐにはその質と量が問題になります．音の間仕切りに壁の質と量がどのように関係するかを理解しておくなら，いつか役に立つ時があるでしょう．

質量則とは

コンクリートの厚さが1mにもなるので，何とかよい方法を考えてほしいという相談を持ち込まれたのは，本州と北海道を結ぶ青函トンネルが開通する少し前のことでした．トンネル内の列車を動かすための非常用ディーゼル発電機から出る騒音をコンクリートの建物で囲い，敷地の境界で40 dB以下にする，というものです．1mという値はどこから出たのでしょうか．

重いコンクリートの壁で音の間仕切りを設けても，音の圧力によって壁は振動し，この壁の振動により，仕切られたもう一方の側の空気の密度が壁の近傍で変動します．これが壁を透過した音です．

厚さ1mのコンクリートの壁の場合，壁に入射した音に対して透過した音の大きさは，周波数500 Hzの音なら音圧比で約1万分の1，−80 dBの減衰になります．この値は壁の遮音効果を計算するときに用いる質量則を使って求めたものです．

壁が単体でその厚さが音の波長に比べて十分薄く，壁の振動はピストン運動と仮定した場合，単位面積当たりの壁の質量をm（kg/m²），音の周波数をf（Hz）とすると，減衰量（透過損失）D_1は，

$$D_1 \simeq 20 \log_{10}(m \cdot f) - 43 \text{ (dB)}$$

で与えられます．これが質量則です．

建物の中でディーゼル発電機の音を500 Hzで120 dB，建物の外で40 dBとすると，D_1は80 dBとなり，mの値は約2,700になります．コンクリートの1m³当たりの質量（密度）を2,200 kgとすると，壁の厚さは約1.2mと出ます．まるで，要塞のような建物になります．

質量則によれば減衰量D_1を6 dB増やすためには，コンクリートの壁の厚さを2倍にしなければならないことがわかります．しかし，壁をもう一つ設ければ減衰量は$2D_1$となるので，大きな減衰量が必要なときは壁の厚さを増やすよりも壁を2重にする方が効果も大きく，経済的です．

ただし，壁を2重にしたときの減衰量が個々の壁の減衰量の和になるのは，2つの壁が構造的に分れていて，その間隔が十分に大きい場合に限られます．それでも2つの壁が接触しないようにすれば，わずかな間隔でも二重に設けられた壁による減衰量は，厚さを増やした1つの壁の減衰量よりもかなり大きなものになります．

前述のコンクリートの壁厚が1mにもなる建物は，厚さ20 cmほどのコンクリートの壁としてその内側にボードを多層貼りした壁を作り，給排気の消音チャンバーを建物に組み入れ，こうして費用もあまりかけないで，大きな減衰量の得られる建物とすることができました．

厚さ無限の壁の場合

厚さが無限大の壁に音波が入射したときはどのようになるでしょうか．質量則では答は出てきません．

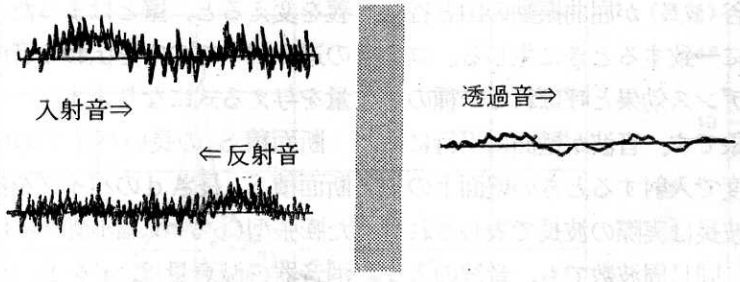
この場合は2つの媒質の境界における音の反射と透過の問題になります．2つの媒質をそれぞれAおよびBとし，媒質Aの密度ρ_1と音速c_1の積と，媒質Bの密度ρ_2と音速c_2の積との比をrとします．2つの積はそれぞれの媒質に固有の値で，媒質を伝搬する平面波の音圧と粒子速度の比になるので，これを固有音響抵抗とか特性音響インピーダンスと呼びます．

この特性インピーダンスの比rを使うと，媒質Aを伝搬して来た平面波が媒質Bとの境界で反射したときの入射音圧と反射音圧の比Rは，

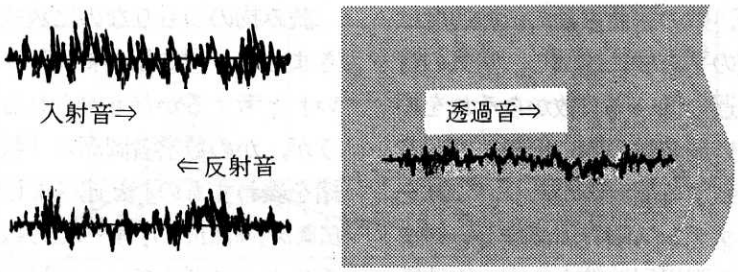
$$R = \frac{1-r}{1+r}$$

と表わされます．このRを音圧反射係数といいます．

密度と音速がわかれば，いろいろ



〈第 6・1 図〉 壁を使って音を遮断する．透過音に対してはローパス・フィルタのように作用する



〈第 6・2 図〉 2つの媒質の境界では反射する音と透過する音に分れる．透過する音に対してはアッテネータのように作用する

な媒質の組み合わせによる境界面での音圧反射係数が求まります．

第1表に示した値を用いると，たとえばAを空気，Bをコンクリートとすると，rは0.0001，Rは0.9998になります．Aを水とするとrは0.37，Rは0.46となるので，水中ではコンクリートの壁が音をよく通すことがわかります．用水池の魚は人が近づく足音がよく聴こえているようです．

晴天に生じた乱気流は目に見えず，レーダーも捕らえることができません．これは特に着陸態勢に入った航空機にとって大きな脅威になります．

乱気流のあるところは局所的に気圧が変動し，空気の密度が変化します．境界は複雑ですが，密度の違う部分があればその境界で音は反射することになります．たとえば，気圧に1%の変化が生じると，密度に1%ほどの差ができて，Rは0.01の大きさ（オーダー）の値が生じます．

そこで地上から上空に向けて音圧120 dBのパルスを発生したとすれば，距離減衰を40 dBとして，音圧40 dBの反射音が戻ってきます．エネルギーにして反射音の大きさは百万分の一になりますが，指向性マイクロホンや帯域フィルタを使えば音圧40 dBは観測できる値です．

厚さが有限の壁の場合

波長に比べて壁の厚さが十分に小さい場合は，壁による音の減衰量は質量則によって表わされますが，質量則は単純に壁を質量に置き換えたときに求まる壁の減衰量の第一近似です．では，壁の厚さを考慮すると，どうなるのでしょうか．

第1近似のつぎのステップは3媒質を通過する音の問題になります．媒質をA，B，Cとして，AとCは同じ媒質とします．媒質Bの厚さをd，音速をc_2，媒質AとBの特性音響インピーダンスの比をrとすれば，媒質Bを通過する音の減衰量（透過損失）D_2は，

$$D_2=10\log_{10}\left[1+\frac{1}{4}\left(r-\frac{1}{r}\right)^2\sin^2 u\right]\ (\mathrm{dB}) \qquad (u=2\pi fd/c_2)$$

で与えられます．

この式は，たとえば媒質AとCが空気でBがコンクリートの場合，逆にAとCがコンクリートで，Bが空気（隙間）である場合，そのどちらの場合も使えます．

Bを厚さ12 cmのコンクリートとし，その音速を毎秒1,890 m，密度を1 m³当り2,200 kgとすると，rは約0.0001となり，500 Hzの減衰量は60 dBになります．逆にBを空気とすると，rは10,000となり，減衰量は73 dBになります．

rが1より十分小さく，波長c_2/fが厚さdより十分に大きい場合，D_2はD_1で表わされます．厚さdが半波長の整数倍となる周波数ではD_2が0となり，音は減衰することなく壁あるいは空隙を通り抜けてしまいます．これはその厚さで媒質が共振するためです．

上記の例では，厚さ12 cmで共振を生じる最も低い周波数は，空隙の場合1.4 kHz，コンクリートの場合7.9 kHzです．媒質には固有の内部損失があるので，共振して減衰量が0になることはありませんが，共振周波数で減衰量はいちじるしく低下します．

ここで，固体を伝わる音を3媒質の構造によってどのくらい遮断できるか，コンクリートにゴム，あるいはコルクをはさみ込んだ場合の減衰量を計算してみましょう．

第1表を使いゴムとコルクとコンクリートの特性音響インピーダンスを求めると，ゴムは2.8×10^4，コルクは1.2×10^5，コンクリートは

物質名	密度 (kg/m³)	音速 (m/s)
空気（20℃）	1.205	344
ゴム（黒）	920	31
コルク	240	480
水	1,000	1,460
コンクリート	1,800〜2,500	2,000〜1,600
鉄	7,900	5,130

〈第1表〉 物質の密度と音速

逆相音を出し，室内全体にわたって音圧を下げます．

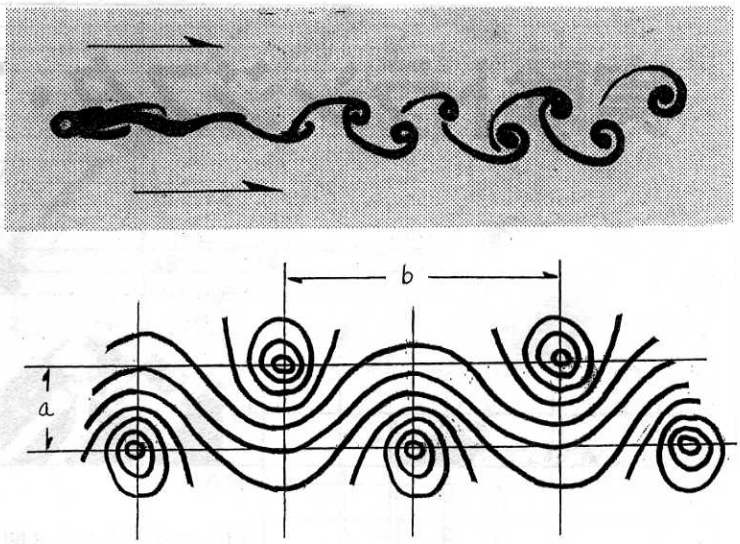
室の共振が顕著であれば，このようにしてうなっている音を 10 dB 程度小さくすることができます．大がかりな工事を必要としないので，これは使える方法です（杉田，音響学会講演論文，1977 年 10 月）．

6 章のキー・ワード説明

● 等価回路

音圧を電圧に，粒子速度を電流に対応させると，音響現象の動作のある範囲を電気回路の動作で表わすことができます．このような回路を等価回路といいます．本文に示した減衰量 D_2 の式は，$d \ll c_2/f$ として $r \gg 1$ とすると，音の間仕切の減衰量を与え，$r=1$ は間仕切なし，$r \ll 1$ は固体を伝わる音（固体音）の間仕切の減衰量を与える式になります．

そこで，入射音圧 P_1 の 2 倍を入力電圧，透過音圧 P_2 を出力電圧，粒子速度 I，I_1，I_2 を回路の電流とし，R を入射側および透過側の媒質の音響インピーダンス，L を壁の単位面積当たりの質量，C をクッションのスティフネス K の逆数にそれぞれ対応する値とすれば，それぞれについて等価回路が得られます．等価回路は物理現象を理解する助けです．



〈第 6・8 図〉
カルマン渦の例．周期的に生じる渦のパターンは理論的に示すことができる

● カルマン渦

流れの中に立てた円柱の背後に渦が生じるとき，渦列が規則的になるための安定条件は $\sinh(\pi a/b)=1$ であることを示したのは，ゲッチンゲン大で研究をしていたハンガリー人のカルマン（Theodore von Karman，1881～1963）です．それで，このような渦をカルマン渦といいますが，トムソン（J. J. Thomson，1856～1940）も同じような結果を得ていたので，ケンブリッジ大ではこれをトムソン効果といいました．

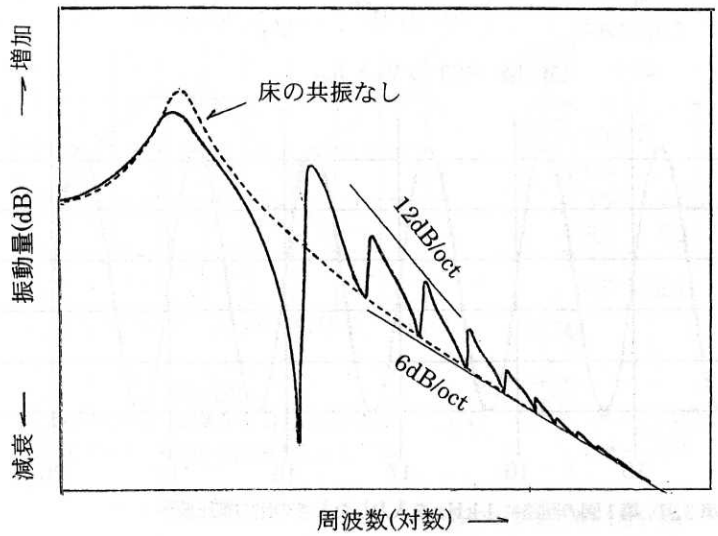
空中でカルマン渦が発生すると音が出ます．たとえば，風の吹く日に電線のうなる音，回転する縄跳びの縄の鳴る音などです．流れの境界が急激に変化するところでも渦は生じます．空調のダクトの吹出口の角で笛のような音がするときは，角を丸くして渦が生じないようにすれば音は止みます．

高速気流がパイプから出るときに発生する強烈な高音は，車のマフラーのようなものでは止まりません．この場合はパイプの開口端付近に穴を分散して開けて渦の発生を防げば，音を止めることができます．

● 防振

ほとんどの教科書（専門書）では，質量とバネと振動しない床で構成された 1 自由度（共振周波数 1 個）の振動モデルによって防振効果の説明をしています．しかし実際に測定してその効果を示そうとしても，振動しない床というものは実在しません．床が振動するので，防振対策が必要になります．

モータなどの振動源をコンクリートの床に直接据え付けた場合と，防振ゴムやバネを介して据え付けた場合の振動の差を減衰量として表わすと，減衰特性には多数の山谷が現われます．1 自由度のモデルでは床の共振付近で生じる振動の増加は予測できません．そこでは防振の効果はいちじるしく低下します（音響学会建築音響研 AA 78-20）．



〈第 6・9 図〉
振動する床に置かれた回転機からの振動を防振ゴムなどで遮断したときの防振効果．点線のようにならない